



Structural Analysis and Regime Shift of Drought in Iran Using a Three-Dimensional Clustering Approach

Javad Mahdizadeh Soula ¹, Yousef Ghavidel Rahimi ^{2*}, Manuchehr Farajzadeh ³

^{1,2 & 3}Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 05 June 2025

Revised: 02 July 2025

Accepted: 03 August 2025

Available Online: 05August 2025

Keywords:

Three-Dimensional
Drought Clustering

Self-Calibrating Palmer
Drought Severity Index
(scPDSI)

Drought Regime Shift

TerraClimate Dataset

Cluster Size Filtering

ABSTRACT

This study investigates the structural evolution and regime shifts of droughts in Iran from 1958 to 2022 using a three-dimensional clustering approach. The analysis utilised high-resolution (~4 km) climate data from the TerraClimate dataset. By applying thresholding to the Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI) and identifying connected components within the spatiotemporal domain, drought clusters were extracted as continuous events. To refine the clusters, a minimum size filter was applied, with the optimal value determined using a geometric angle-based optimisation method. The findings indicate a substantial shift in Iran's drought patterns, particularly after 2000, as drought occurrences transitioned from brief, sporadic events to more prolonged and widespread systems. Among the five drought severity thresholds examined, the moderate drought threshold (−2.0) was identified as optimal, providing a balanced trade-off between event frequency and spatial coverage. Additionally, a minimum cluster size of 16 voxels was established as the geometric filter threshold, effectively eliminating noise (small, transient clusters) while preserving significant drought events and enhancing structural coherence. The results demonstrate that drought clusters since 2000 have become larger, more persistent, and spatially extensive. Simultaneously, regions in central, western, northeastern, and northwestern Iran—previously less affected by severe drought—have emerged as new hotspots of persistent drought activity, showing a significant increase in both event frequency and duration. The integration of a 3D clustering framework and threshold optimisation introduces a methodological innovation to drought studies, enhancing scientific understanding and supporting improved drought adaptation strategies and early warning systems across Iran.

* Corresponding author: Dr. Yousef Ghavidel Rahimi

E-mail address: ghavidel@modares.ac.ir

How to cite this article: Mahdizadeh Soula, J., Ghavidel Rahimi, Y., & Farajzadeh, M. (2025). Structural Analysis and Regime Shift of Drought in Iran Using a Three-Dimensional Clustering Approach. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94525.1597>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Drought is a complex environmental hazard with far-reaching ecological, agricultural, and social impacts. In Iran's arid and semi-arid climates, its persistence has intensified the risks to water and land resources. While traditional studies have used indices such as the SPI and PDSI at local scales, they often lack the spatiotemporal continuity needed to capture full drought dynamics.

This study addresses this gap by applying a three-dimensional clustering approach to monthly scPDSI data (1958–2022) from the high-resolution TerraClimate dataset. Using a connected component labeling algorithm and a geometric threshold optimization method, this study identified and analyzed meaningful spatiotemporal drought clusters across Iran.

The goal was to evaluate the structural patterns and regime shifts in drought behavior. This method offers a novel contribution to drought monitoring and supports an improved understanding and adaptation planning.

Material and Methods

This study applied a multi-step, observational approach based on three-dimensional clustering of monthly scPDSI data to analyze spatiotemporal drought events in Iran (1958 to 2022). The framework, adapted from Diaz et al. (2024), included three main steps: (1) 3D connected component labeling to extract continuous drought clusters; (2) cluster size filtering to remove small insignificant structures; and (3) threshold sensitivity analysis to determine the optimal drought intensity level.

Drought severity was measured using the Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI), calculated from the TerraClimate dataset, which offers ~4 km resolution gridded climate variables. Data processing was conducted in MATLAB and involved creating a 3D data cube (latitude–longitude–time) and converting scPDSI values to binary drought classifications using five thresholds (–0.5 to –4.0). The resulting binary maps were used to detect, filter, and analyze major drought events in the study area.

Results and Discussion

This study identified and analyzed over 7,400 drought clusters across Iran from 1958 to 2022 using 3D clustering of scPDSI data. The number, size, and duration of the detected clusters were highly sensitive to both scPDSI thresholds and minimum size filters. At milder thresholds (e.g., –0.5), many clusters were small and short-lived; however, with stricter thresholds (e.g., –4), fewer clusters were observed, but they were spatially extensive and temporally persistent.

A geometric optimization technique based on curvature analysis (cos C method) was used to determine the optimal cluster size filter. The threshold of scPDSI = –2 and a minimum size of 16 voxels yielded the most coherent and hydrologically meaningful drought events. This filter eliminated noise while preserving significant long-term events, enabling a clearer depiction of the drought structure.

Temporal analysis revealed an upward trend in the percentage of land under drought (PDA) since 2000, with increasingly frequent and spatially synchronized drought episodes occurring. Moderate droughts (–2) peaked during key periods, such as the late 1960s, the early 1980s, and post-2000, whereas extreme droughts (–4) became more prominent after 2000. Spatial maps confirmed that long-duration droughts predominantly affected the central, western, and northeastern provinces, whereas previously low-risk regions (e.g., Golestan, Ardabil, Razavi Khorasan) emerged as new hotspots.

The findings indicate a regime shift in Iran's drought behavior over the past two decades, with events becoming more chronic, extensive, and synchronized. This transformation underscores the inadequacy of short-term or localized drought interventions. Instead, this study highlights the need for regionally integrated and long-term adaptive strategies. The use of 3D object-based analysis provides new insights

into spatiotemporal drought dynamics and offers a replicable framework for advanced drought monitoring in arid regions.

Conclusions

This study provides a comprehensive structural analysis of drought events in Iran from 1958 to 2022 using a novel 3D clustering framework applied to high-resolution climate data. This method enabled the identification of droughts as continuous spatiotemporal phenomena, independent of administrative or station-based constraints.

The results revealed a regime shift toward more persistent and extensive droughts after the early 2000s, with events becoming longer, more widespread, and frequent. This transition may be attributed to climate change and ocean–atmosphere variability, signaling increased cumulative risks to ecosystems and the economy of the region.

Through a systematic threshold sensitivity analysis, a scPDSI value of -2.0 was identified as the optimal threshold, balancing event frequency and physical relevance. Additionally, a geometric optimization technique established a cluster size filter of 16 voxels, which improved the reliability of the identified events by removing noise without excluding significant droughts.

Spatial analysis revealed that while traditionally arid regions remain vulnerable, new drought hotspots have emerged in the central, western, and northern provinces, necessitating a re-evaluation of regional drought risk maps and adaptation strategies.

This study demonstrates the value of 3D clustering in understanding the complex spatiotemporal nature of droughts. While this study focused on static attributes, such as duration and extent, the framework also lends itself to future dynamic analyses of drought propagation. Integrating this method into climate monitoring systems can enhance early warning capabilities by detecting emerging drought clusters and predicting their development pathways.

In summary, this study shows that a multidimensional and systems-based perspective on drought can significantly improve both scientific understanding and practical response capacity. Future studies should integrate climate change scenarios and link drought clusters to economic and environmental impact data to enhance national resilience.



تحلیل ساختار و تغییر رژیم خشکسالی در ایران با رویکرد خوشه‌بندی سه‌بعدی

جواد مهدی زاده سولا^۱، یوسف قویدل رحیمی^{۲*}، منوچهر فرج زاده اصل^۳

^{۱،۲} جغرافیای طبیعی، علوم انسانی، تربیت مدرس، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲	این پژوهش به تحلیل ساختار و تغییر رژیم خشکسالی‌های ایران طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ با بهره‌گیری از رویکرد خوشه‌بندی سه‌بعدی می‌پردازد. در این راستا، داده‌های اقلیمی با وضوح مکانی بالا (در حدود ۴ کیلومتر) از مجموعه داده‌های TerraClimate مورد استفاده قرار گرفته است. با آستانه‌گذاری مقادیر scPDSI و شناسایی مؤلفه‌های متصل در فضای مکان-زمان، خوشه‌های خشکسالی به‌عنوان رخداد‌های پیوسته استخراج گردیدند. جهت پالایش خوشه‌ها، فیلتر حداقل اندازه اعمال شد که مقدار بهینه آن بر اساس روش بهینه‌سازی هندسی زاویه تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهد رژیم خشکسالی ایران، به‌ویژه پس از دهه ۲۰۰۰ دچار دگرگونی چشمگیری شده است؛ به‌طوری‌که الگوی غالب از رخداد‌های پراکنده و کوتاه‌مدت به سامانه‌های پایدارتر و گسترده‌تر تبدیل شده است. در تحلیل پنج آستانه مختلف شدت خشکسالی، آستانه خشکسالی متوسط (۲-) به‌عنوان آستانه بهینه شناسایی شد که توازن مطلوبی میان فراوانی و گستره مکانی خوشه‌ها ایجاد می‌کند. همچنین فیلتر هندسی ۱۶ وکسل (voxel) به‌عنوان حداقل اندازه خوشه تعیین شد که با حذف نوفه (خوشه‌های کوچک و گذرا) و حفظ رخداد‌های معنادار، انسجام بالاتری به نتایج می‌بخشد. یافته‌ها حاکی از آن است که بعد از سال ۲۰۰۰، خوشه‌های خشکسالی بزرگ‌تر، بادوام‌تر و از نظر مکانی وسیع‌تر شده‌اند. به‌موازات این تغییر رژیم، مناطق مرکزی، غربی، شمال شرقی و شمال غربی کشور که پیش‌تر کمتر در کانون خشکسالی‌های شدید بودند به کانون‌های جدید خشکسالی‌های پایدار تبدیل شده‌اند و تعداد و طول دوره‌های خشکسالی در آن‌ها به طور معناداری افزایش یافته است. این چارچوب خوشه‌بندی سه‌بعدی و بهینه‌سازی آستانه، نوآوری روش‌شناختی مهمی را در مطالعه خشکسالی ارائه می‌دهد و می‌تواند به درک علمی عمیق‌تر و بهبود برنامه‌ریزی‌های سازگاری و هشدار پیش‌هنگام خشکسالی در ایران کمک کند.
کلمات کلیدی: خوشه‌بندی سه‌بعدی خشکسالی scPDSI تغییر رژیم خشکسالی TerraClimate فیلتر اندازه خوشه	

مقدمه

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین و گسترده‌ترین مخاطرات اقلیمی به‌شمار می‌رود که در ابعاد مکانی و زمانی به‌صورت هم‌زمان گسترش یافته و آثار پایداری بر اکوسیستم‌ها، بخش کشاورزی و جوامع انسانی برجای می‌گذارد. این پدیده در گذشته صرفاً به‌صورت کاهش بارندگی طی یک دوره زمانی تعریف می‌شد؛ اما در دهه‌های اخیر، با توجه به افزایش فهم علمی از رفتار خشکسالی، به‌عنوان پدیده‌ای چندبُعدی شناخته شده است که ویژگی‌هایی همچون ناهمگنی فضایی، تداوم زمانی، و پویایی‌های پیچیده‌ی انتشار را دربر می‌گیرد (Andreadis, Clark, Wood, Hamlet & Lettenmaier, 2005; World Meteorological Organization [WMO], 2006; Sheffield, Wood & Roderick, 2012). این تحول مفهومی منجر به توسعه چارچوب‌های تحلیلی نوینی شده است که به‌جای تکیه صرف بر شاخص‌های زمانی، امکان تحلیل هم‌زمان مدت، شدت، گستره مکانی و حتی مسیرهای حرکتی خشکسالی را فراهم می‌سازند (Herrera-Estrada & Diffenbaugh 2020, Wei et al., 2025).

در این میان، پیشرفت چشم‌گیر در تولید داده‌های شبکه‌ای با تفکیک‌پذیری مکانی بالا، به‌ویژه مجموعه داده‌های MSWEP (Funk et al., 2015) و Terra Climate (Abatzoglou, Dobrowski, Parks & Hegewisch, 2018)، فرصت مناسبی برای پایش و تحلیل خشکسالی در مناطق فاقد پوشش ایستگاهی فراهم کرده است. در حوزه سنجش شدت و تداوم خشکسالی، شاخص پالمر (PDSI) و به‌ویژه نسخه خودتنظیم آن (scPDSI)، به‌واسطه ترکیب بارش، دما و تبخیر و تعرق بالقوه، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده گسترده قرار گرفته است (Wells, Goddard & Hayes, 2004). کارایی scPDSI در بازنمایی شرایط رطوبتی بلندمدت در بسیاری از نقاط جهان، از جمله ایران، مورد تأیید قرار گرفته است (Gebrechorkos, Hülsmann & Bernhofer, 2019; Sadeghi, Ghavidel & Farajzadeh, 2022).

ایران به‌دلیل اقلیم خشک و نیمه‌خشک، بارندگی محدود، و پراکنش نامتوازن منابع آب، به‌شدت در معرض خطر خشکسالی قرار دارد. میانگین بارش سالانه در بخش وسیعی از کشور کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر است (Peel, Finlayson & McMahon, 2007; Vaghefi et al., 2019; Fathi Taperasht, Shafizadeh-Moghadam & Kouchakzadeh, 2022; Najafi & Alizadeh, 2023). تنوع توپوگرافی و اقلیمی از ارتفاعات البرز و زاگرس تا دشت‌های مرکزی، واکنش‌های متفاوتی را در برابر کم‌بارشی ایجاد کرده و شرایط را برای بروز و تشدید خشکسالی فراهم ساخته است (Alayi-Talaghani, 2009; Khosravi, Abbasnia, Ghobadi & Armesh, 2017). در سال‌های اخیر، خشکسالی‌های مکرر منجر به افت شدید منابع آب، کاهش عملکرد کشاورزی و افزایش آسیب‌پذیری معیشت‌های محلی شده‌اند (Madani, 2014; Cook, Ault & Smerdon, 2015; Forootan et al., 2017). با وجود اهمیت موضوع، اغلب مطالعات انجام‌شده در ایران، مبتنی بر شاخص‌هایی مانند SPI، SPEI و PDSI، عمدتاً در مقیاس محلی یا استانی و بر پایه داده‌های نقطه‌ای بوده‌اند (Hosseini, Ghavidel & Farajzadeh, 2021; Razmi, Sotoudeh, Ghane & Ostad, 2022). این رویکردها به‌دلیل ضعف در تفکیک مکانی و پوشش زمانی پیوسته، قادر به نمایش کامل ساختار، تداوم و مسیرهای مکانی خشکسالی نیستند. علاوه‌براین، پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که نه‌فقط ویژگی‌های فردی خشکسالی، بلکه هم‌پوشانی آن با پدیده‌هایی چون موج گرما یا خشکسالی کشاورزی نیز اثرگذاری آن را تشدید می‌کند (Yang et al., 2024; Liu, Hu & Mo, 2025).

در این راستا، ضرورت استفاده از روش‌هایی نوین که بتوانند رفتار خشکسالی را در قالب پدیده‌ای یکپارچه در بستر مکان-زمان تحلیل کنند، بیش‌ازپیش احساس می‌شود. یکی از نوآوری‌های مهم در این زمینه، بهره‌گیری از الگوریتم‌های خوشه‌بندی سه‌بعدی است که خشکسالی را به‌عنوان شیء پیوسته در فضا-زمان (عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، زمان) شناسایی می‌کنند و تحلیل هم‌زمان ویژگی‌هایی مانند شدت، وسعت، مدت و مسیر انتشار را امکان‌پذیر می‌سازند (Lloyd-Hughes, 2012; Herrera-Estrada & Diffenbaugh, 2020). برای نمونه پیارالی و همکاران (Pyarali, Peng, Disse & Tuo, 2022) و ورنیوو و همکاران (Vernieuwe, De Baets & Verhoest, 2020) با استفاده از خوشه‌بندی پدیده‌محور، به ردیابی رویدادهای خشکسالی در مقیاس‌های منطقه‌ای و قاره‌ای پرداخته‌اند. چارچوب ارائه‌شده توسط دیاز و همکاران (Diaz, Corzo Perez, Van Lanen & ...)

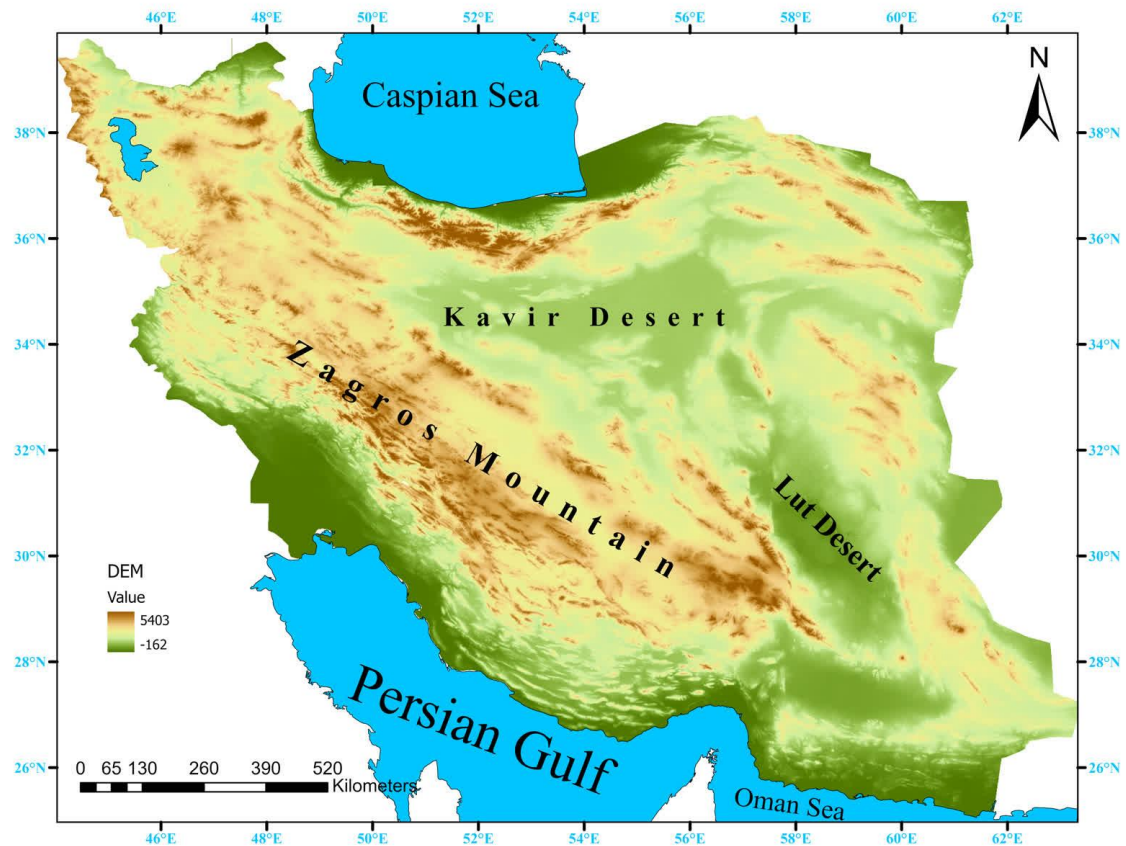
(Solomatine, 2024) یکی از پیشرفته‌ترین نمونه‌های این رویکرد است که با ترکیب مؤلفه‌های متصل سه‌بعدی، فیلترهای اندازه و آستانه شدت، ابزار قدرتمندی برای استخراج و تحلیل رخدادهای معنادار خشکسالی فراهم می‌کند. از سوی دیگر، مطالعات جدید به ابعاد پیچیده‌تری از خشکسالی نیز پرداخته‌اند، از جمله خشکسالی‌های مرکب و هم‌زمان با موج گرما یا خشکسالی کشاورزی. برای مثال لیو و همکاران (Liu et al., 2025) روند افزایشی رخدادهای هم‌زمان خشکسالی و موج گرما را در چین نشان داده‌اند و یانگ و همکاران (Yang et al., 2024) نیز با مدل Vine Copula، نقش مؤلفه‌هایی چون مدت و گستره مرکب را در بروز خشکسالی‌های کشاورزی تأیید کرده‌اند. یافته‌های وانگ و همکاران (Wang, Jia, Tang & Liu, 2025) نیز بیانگر الگوهای وابسته فضایی معنادار در ریسک خشکسالی میان استان‌های همجوار است که بر لزوم بهره‌گیری از روش‌های ساختارمحور و پویایی‌محور دلالت دارد.

باوجود پیشرفت‌های اخیر در تحلیل‌های مکانی-زمانی خشکسالی، در ایران همچنان خلأ قابل توجهی در استفاده از رویکردهای سه‌بعدی و داده‌های با تفکیک بالا برای شناسایی و پایش ساختارهای پیچیده خشکسالی وجود دارد. پژوهش حاضر باهدف پر کردن این شکاف، برای نخستین‌بار در مقیاس ملی، از چارچوب خوشه‌بندی سه‌بعدی توسعه‌یافته برای تحلیل جامع خشکسالی‌های ایران طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ بهره گرفته است. این چارچوب بر پایه داده‌های شاخص خود تنظیم پالمر از پایگاه TerraClimate با تفکیک‌پذیری مکانی ۴~ کیلومتر بنا شده و شامل الگوریتم شناسایی مؤلفه‌های متصل، پالایش خوشه‌ها بر اساس آستانه بهینه، و تحلیل ویژگی‌های ساختاری نظیر مدت، شدت، گستره و مکان خشکسالی‌هاست. همچنین، با تمرکز بر دهه‌های اخیر، این مطالعه تلاش دارد تا گذار احتمالی رژیم خشکسالی ایران به‌سوی الگوهای پایدارتر و شدیدتر را نیز ارزیابی کند و بستری برای تحلیل‌های پیش‌نگرانه و سیاست‌گذاری اقلیمی فراهم آورد.

منطقه مورد مطالعه

کشور ایران (شکل ۱) با گستره‌ای در حدود ۱,۶۴۸,۱۹۵ کیلومتر مربع، بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه‌ی شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴ تا ۶۳.۵ درجه‌ی شرقی واقع شده و به‌عنوان دومین کشور پهناور منطقه‌ی غرب آسیا شناخته می‌شود. موقعیت جغرافیایی ایران در محل همگرایی سامانه‌های پرفشار جنب‌حاره‌ای اوراسیا و کمربند خشک جنوب‌غرب آسیا، همراه با ساختار پیچیده‌ی توپوگرافی شامل رشته‌کوه‌ها، فلات‌های داخلی و حوضه‌های وسیع بیابانی، زمینه‌ساز شکل‌گیری شرایط اقلیمی بسیار متنوع در سراسر کشور شده است (Peel et al., 2007; Najafi & Alizadeh, 2023; Khosravi et al., 2017).

یکی از مؤلفه‌های اقلیمی مؤثر بر اقلیم ایران، نزدیکی این سرزمین به مدار رأس‌السرطان است که ایران را در کمربند جهانی خشکی نیمکره‌ی شمالی قرار می‌دهد (Alayi-Talaghani, 2009). این موقعیت منجر به دریافت شدید تابش خورشیدی، افزایش تبخیر و تعرق بالقوه و گسترش کم‌آبی، به‌ویژه در مناطق مرکزی و شرقی کشور شده است. اختلاف ارتفاع قابل توجه از سواحل مرطوب دریای خزر در شمال تا بیابان خشک لوت در جنوب شرق کشور، منجر به شکل‌گیری پهنه‌های اقلیمی متنوعی شده است که نقشی تعیین‌کننده در رفتار مکانی خشکسالی ایفا می‌کنند. این تنوع اقلیمی که تحت تأثیر عرض جغرافیایی، اختلاف ارتفاع و فاصله از منابع رطوبتی شکل گرفته است، پیامدهای مهمی برای آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی و مدیریت منابع آب در کشور دارد. تفاوت‌های منطقه‌ای اقلیم بر ضرورت به‌کارگیری روش‌هایی تأکید می‌گذارند که ابعاد فضایی و زمانی رخدادهای خشکسالی را به‌صورت هم‌زمان موردتوجه قرار دهند. به‌ویژه، این وضعیت نیاز به بهره‌گیری از روش‌های دقیق و با تفکیک مکانی بالا (نظیر خوشه‌بندی سه‌بعدی خشکسالی) را برای تحلیل نحوه شکل‌گیری، گسترش و تشدید خشکسالی در مناطق متنوع اکولوژیکی و اقلیمی ایران برجسته می‌سازد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه
Fig. 1. Study Area

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای شناسایی و تحلیل ساختاری خشکسالی‌ها در ایران از یک چارچوب نوین خوشه‌بندی سه‌بعدی مکانی-زمانی بهره گرفته شد که بر اساس مدل مفهومی ارائه‌شده توسط دیاز و همکاران (Diaz et al., 2024) طراحی گردید. این چارچوب شامل شناسایی مؤلفه‌های پیوسته، پالایش خوشه‌ها بر مبنای اندازه و دوام، و بهینه‌سازی آستانه‌های شدت است و امکان تحلیل یکپارچه شدت، گستره و پویایی رخداد‌های خشکسالی را فراهم می‌کند.

شاخص مورد استفاده برای سنجش شدت خشکسالی، $(scPDSI^1)$ بود که به دلیل تنظیم خودکار ضرایب اقلیمی، قابلیت مقایسه‌پذیری مکانی و پاسخ دقیق به ناهنجاری‌های رطوبتی بلندمدت، به‌ویژه در مناطق خشک ایران، گزینه‌ای مناسب محسوب می‌شود (Wells et al., 2004). داده‌های شاخص خودتنظیم پالمر از پایگاه جهانی TerraClimate² استخراج شدند؛ پایگاهی که مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی شامل بارش، دما، تبخیر و تعرق بالقوه و شاخص PDSI را در بازه زمانی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ به صورت ماهانه و با وضوح مکانی تقریبی ۴ کیلومتر پوشش می‌دهد (Abatzoglou et al., 2018). با توجه به ناهمگونی توپوگرافی ایران و پراکندگی مکانی ایستگاه‌های زمینی، داده‌های TerraClimate گزینه‌ای مناسب برای پایش ملی خشکسالی در مقیاس شبکه‌ای به‌شمار می‌روند.

1- Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index
2 - <http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>

در راستای سنجش اعتبار این داده‌ها برای اقلیم ایران، عراقی و همکاران (Araghi, Martinez & Adamowski, 2023) به مقایسه داده‌های TerraClimate با مشاهدات ایستگاهی در مناطق مختلف اقلیمی کشور پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که این پایگاه عملکرد بسیار مناسبی در برآورد تابش خورشیدی ($R^2 = 0.95-0.98$)، دمای حداقل و حداکثر ($R^2 = 0.98-0.99$) و بارندگی ($R^2 = 0.70-0.85$) دارد. این یافته‌ها مؤید آن است که داده‌های TerraClimate می‌توانند به‌عنوان منبعی معتبر برای مطالعات اقلیمی و خشکسالی در ایران مورد استفاده قرار گیرند.

تمام داده‌های شاخص خودتنظیم پالمر در محیط نرم‌افزاری MATLAB پردازش شده‌اند. در این فرایند، ابتدا ماتریس داده‌ای چهاربعدی با ابعاد $(481 \times 361 \times 780)$ شامل طول و عرض جغرافیایی، زمان و مقادیر شاخص خودتنظیم پالمر تشکیل شد. سپس، با اعمال مقادیر آستانه‌ای شامل ۵، ۰، ۱، ۲، ۳، ۴ (بر اساس طبقه‌بندی استاندارد شدت خشکسالی پالمر)، نقشه‌های دودویی ماهانه ایجاد گردید. در این مرحله، سلول‌های مکانی-زمانی (وکسل‌ها) که مقدار آن‌ها کمتر از آستانه بود، به‌عنوان نقاط خشکسالی (با مقدار ۱) و سایر نقاط در کلاس غیرخشکسالی (با مقدار ۰) دسته‌بندی شدند (جدول ۱).

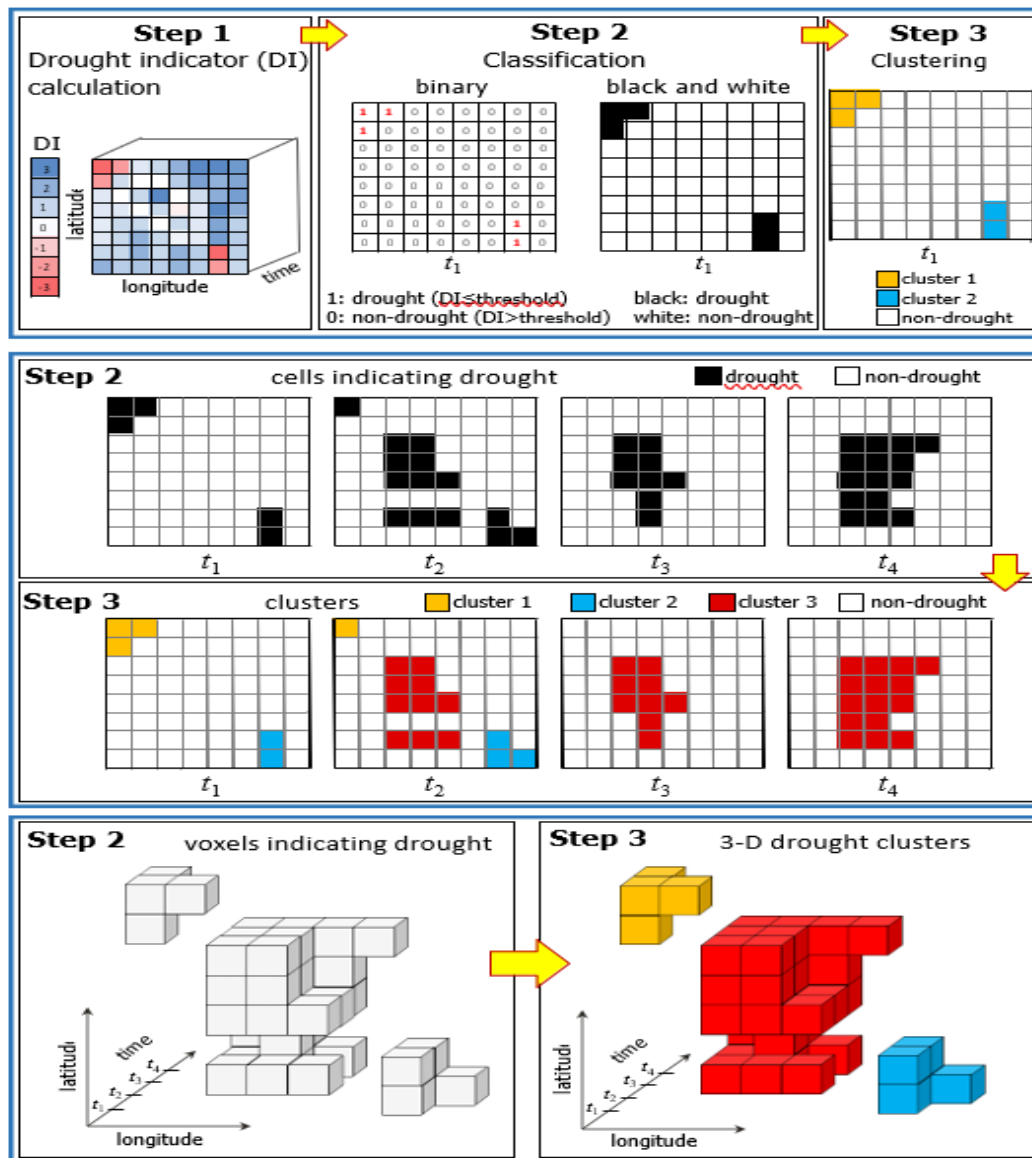
این پژوهش از نوع مطالعات کاربردی با رویکرد توصیفی - تحلیلی و مبتنی بر داده‌های ثانویه اقلیمی با رویکرد کمی است. با بهره‌گیری از شاخص scPDSI و چارچوب خوشه‌بندی سه‌بعدی، به تحلیل ساختارهای زمانی - مکانی خشکسالی در ایران طی سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ پرداخته شد. این رهیافت داده‌محور، بستری مناسب برای تحلیل دینامیک فراوانی، شدت، طول عمر و الگوهای فضایی خشکسالی در مقیاس ملی فراهم ساخت.

جدول ۱- طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص شدت خشکسالی خود تنظیم پالمر (scPDSI)

Table 1- Drought Classification Based on the Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index (Wells et al., 2004)

مقدار شاخص scPDSI Value	طبقه‌بندی خشکسالی Drought Category
> 4	رطوبت بسیار شدید (Extremely Wet)
3 ~ 4	به‌شدت مرطوب (Severely Wet)
2 ~ 3	رطوبت متوسط (Moderately Wet)
1 ~ 2	رطوبت خفیف (Slightly Wet)
0.5 ~ 1	آغاز دوره تر (Incipient Wet Spell)
-0.5 ~ 0.5	تقریباً نرمال (Near Normal)
-1 ~ -0.5	آغاز دوره خشکسالی (Incipient Dry Spell)
-2 ~ -1	خشکسالی خفیف (Slightly Dry)
-3 ~ -2	خشکسالی متوسط (Moderately Dry)
-4 ~ -3	خشکسالی شدید (Severely Dry)
< -4	خشکسالی بسیار شدید (Extremely Dry)

برای شناسایی خوشه‌های مکانی-زمانی پیوسته خشکسالی، الگوریتم برچسب‌گذاری مؤلفه‌های متصل سه‌بعدی (3D Connected Components) مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم که بر اساس همسایگی ۲۶ جهته در فضا عمل می‌کند (Haralick & Shapiro, 1992; Diaz, Perez, Van Lanen, Solomatine & Varouchakis, 2020)، قادر است ساختارهای حجمی متصل درون مکعب فضا - زمان را شناسایی کرده و به هر خوشه خشکسالی برچسب یکتایی اختصاص دهد. این فرایند در MATLAB پیاده‌سازی و برای داده‌های با مقیاس بزرگ ایران بهینه‌سازی گردید (شکل ۲).

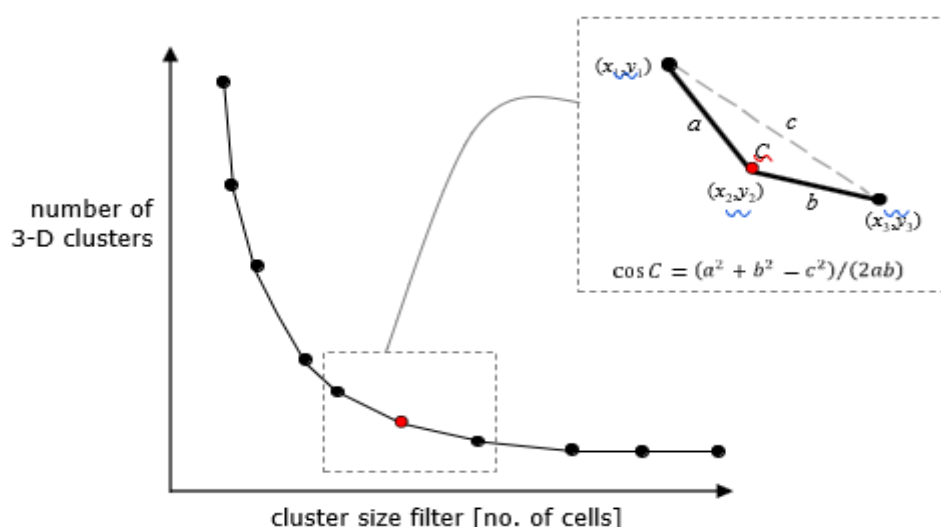


شکل ۲- نمای شماتیک از روش محاسبه خوشه‌های خشکسالی سه‌بعدی (3-D) فرایند شامل سه‌گام اصلی است: (گام ۱) محاسبه شاخص خشکسالی، (گام ۲) طبقه‌بندی و کسل‌ها به حالت خشکسالی و غیرخشکسالی، (گام ۳) محاسبه خوشه‌های سه‌بعدی خشکسالی. پنل‌های میانی و پایینی، نمای دوبعدی و سه‌بعدی در هر گام زمانی (t) را نشان می‌دهند. توجه شود که در فضای دوبعدی از واژه سلول (cell) و در فضای سه‌بعدی از واژه وکسل (voxel) استفاده می‌شود.

Fig.2. Schematic overview of the methodology for 3-D drought cluster calculation: drought indicator calculation (Step 1), classification of voxels in drought (Step 2), and 3-D cluster calculation (Step 3). The middle and bottom panels provide 2-D and 3-D views at each time step (t). Note that when we refer to the 2-D space, we use the term cell, while in the 3-D space we use voxel. (Diaz et al., 2024)

در ادامه، به منظور افزایش انسجام ساختاری و حذف نوفه‌های آماری، خوشه‌های کوچک از تحلیل حذف شدند. برخلاف مطالعاتی که به صورت تجربی اقدام به انتخاب آستانه فیلتر می‌نمایند، در این پژوهش با بهره‌گیری از یک رویکرد هندسی (شکل ۳)، آستانه بهینه به صورت داده‌محور تعیین شد. منحنی رابطه‌ی تعداد رخدادها با اندازه خوشه ترسیم گردید و نقطه‌ی شکست (Elbow Point) این منحنی به عنوان آستانه حداقل اندازه انتخاب شد. براین اساس، خوشه‌هایی با حجم کمتر از ۱۶ وکسل از تحلیل نهایی کنار گذاشته شدند. همچنین، به منظور افزایش پایداری زمانی و حذف نوسانات گذرا، تمام خوشه‌هایی که صرفاً یک ماه

دوام داشتند نیز حذف گردیدند. این پالایش دوسویه مکانی-زمانی، منجر به تمرکز بر خشکسالی‌هایی شد که دارای ساختار فیزیکی منسجم و اهمیت اقلیمی قابل‌اعتنا بودند. برای هر خوشه باقی‌مانده، مجموعه‌ای از ویژگی‌های ساختاری شامل مدت‌زمان (ماه)، گستره مکانی (به‌صورت تعداد وکسل یا معادل کیلومترمربع)، شدت میانگین و بیشینه شاخص خودتنظیم پالمر، مرکز هندسی (Centroid) و حجم خشکسالی (Voxel-Month) محاسبه شد. این شاخص‌ها نه تنها در تحلیل رفتار خشکسالی‌های منفرد، بلکه در ارزیابی پویایی مکانی و شناسایی رژیم‌های غالب خشکسالی در مقاطع زمانی مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت، به‌منظور درک بهتر از الگوی زمینه‌ای خشکسالی، میانگین بلندمدت شاخص خودتنظیم پالمر در کل دوره مطالعه برای هر پیکسل محاسبه شد و نقشه توزیع فضایی آن به‌عنوان لایه مرجع تولید گردید. این نقشه، تصویر دقیقی از نواحی مزمن خشک و مرطوب کشور ارائه داده و مبنای تفسیر رفتار مکانی خوشه‌ها و مسیرهای خشکسالی در سال‌های مختلف قرار گرفت.



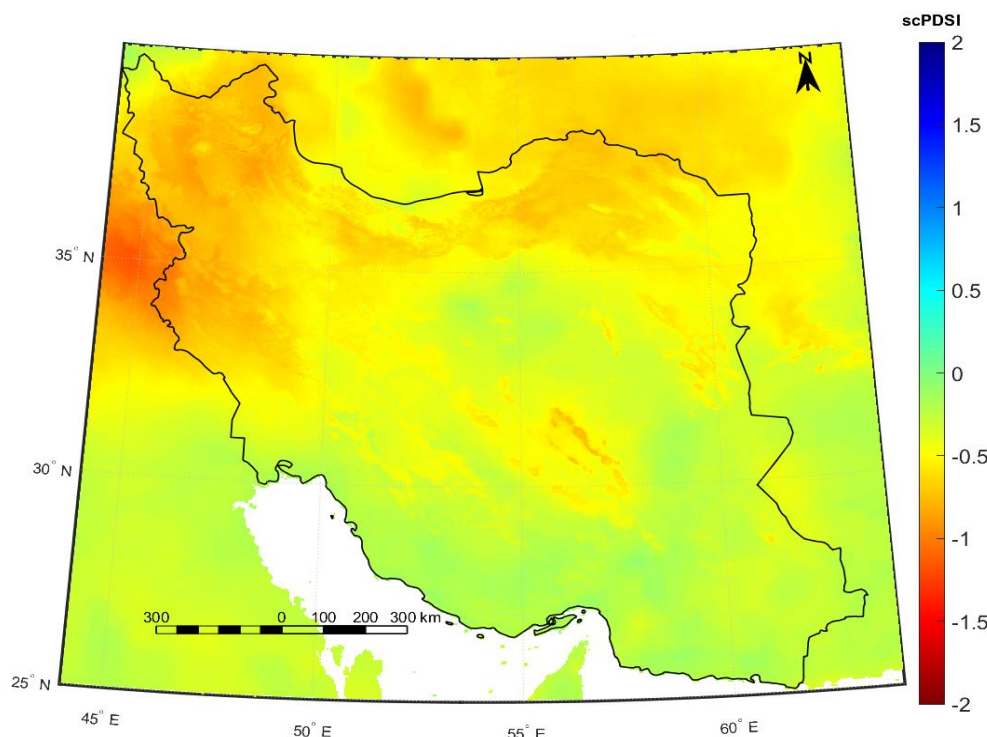
شکل ۳- شماتیک روش محاسبه فیلتر بهینه اندازه خوشه زاویه C با استفاده از اضلاع a، b و c مثلثی که از سه نقطه متوالی روی منحنی تشکیل شده، محاسبه می‌شود (نمای بزرگ‌نمایی شده)

Fig.3. Scheme of the method used to calculate the optimal cluster size filter. Angle C was calculated using the sides *a*, *b*, and *c* of the triangle formed by the three subsequent points (zoomed-in view) (Diaz et al., 2024).

نتایج و بحث

به‌منظور ارائه تصویری کلان از الگوهای بلندمدت خشکسالی، میانگین زمانی شاخص خودتنظیم پالمر برای کل ایران طی بازه ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ محاسبه گردید (شکل ۴). نتایج این نقشه نشان می‌دهد که بخش‌های گسترده‌ای از نیمه‌ی غربی، شمال غرب، مناطق مرکزی و ارتفاعات زاگرس دارای مقادیر منفی شاخص بوده‌اند. این مقادیر منفی، بیانگر غلبه‌ی شرایط خشکسالی مزمن در این نواحی در طی بیش از شش دهه‌ی گذشته است. در مقابل، بخش‌هایی از جنوب شرقی کشور، حوضه‌ی هامون، و نوار جنوبی، در مقایسه با سایر نواحی، دارای مقادیر نزدیک به صفر یا اندکی مثبت‌اند که بیانگر شرایط رطوبتی نسبتاً متعادل یا حتی مرطوب در برخی دوره‌ها بوده است. این تفاوت‌های فضایی در میانگین بلندمدت شاخص، احتمالاً بازتاب‌دهنده‌ی ترکیبی از عوامل اقلیمی، توپوگرافیک و چرخه‌های هیدرولوژیکی منطقه‌ای است. به‌طور کلی، این نقشه زمینه مناسبی برای تحلیل ساختارهای زمانی مکانی

خشکسالی در ایران فراهم می‌سازد و تأکید می‌کند که مخاطره خشکسالی در کشور نه تنها یک پدیده موقتی، بلکه یک ویژگی مزمن و نهادینه شده در بسیاری از مناطق محسوب می‌شود.



شکل ۴- میانگین بلندمدت شاخص شدت خشکسالی پالمر خودتنظیم (scPDSI) در ایران طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲

Fig. 4. Spatial distribution of the long-term mean scPDSI in Iran from 1958 to 2022

تحلیل ساختار خوشه‌های خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص خودتنظیم پالمر در دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ نشان داد که ویژگی‌های زمانی و مکانی رخدادها به شدت وابسته به آستانه شاخص و فیلتر اندازه خوشه هستند. نمودارهای ارائه شده در اشکال ۵ تا ۸ نمایی جامع از ساختار و پویایی خوشه‌های خشکسالی در ایران طی سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ ارائه می‌دهند. این نمودارهای پراکندگی، ویژگی‌های فضایی - زمانی رخدادهای خشکسالی را در بازه‌ای از آستانه‌های شاخص شدت خشکسالی (scPDSI) از ۰٫۵- تا ۴- و فیلترهای مختلف اندازه خوشه (از صفر تا ۱۰۰ وکسل) به تصویر می‌کشند. تفسیر دقیق این الگوها برای درک هندسه خشکسالی‌ها و پالایش رخدادهای معنادار ضروری است.

در شکل ۵، مجموعه اولیه داده‌ها بدون هیچ‌گونه فیلتر یا حذف، ارائه شده‌اند. در این حالت، به‌ویژه در آستانه‌های ملایم مانند ۰٫۵- و ۱-، تعداد زیادی خوشه شناسایی شده‌اند که عمدتاً کوتاه‌مدت و با وسعت مکانی محدود هستند. برای نمونه، در آستانه ۰٫۵- و بدون فیلتر، بیش از ۷۴۵۴ خوشه شناسایی شده است، درحالی‌که در آستانه شدیدتر ۴-، تنها ۱۱۰۳ خوشه باقی‌مانده‌اند. این کاهش چشمگیر بیانگر نقش تعیین‌کننده آستانه در کنترل فراوانی و افزایش معناداری فیزیکی داده‌هاست. اعمال فیلتر ساختاری بر مبنای اندازه خوشه، بهبود قابل توجهی در کیفیت ساختاری رخدادها ایجاد کرده است. برای مثال، در همان آستانه ۰٫۵-، با افزایش حداقل اندازه خوشه به ۱۰۰ وکسل، تعداد رخدادها به طور چشمگیری از ۷۴۵۴ به ۳۲۷ کاهش یافته

است. این روند پالایش در تمامی آستانه‌ها مشاهده می‌شود و نشان می‌دهد که فیلترگذاری ساختاری می‌تواند به حذف نویزهای گذرا و افزایش انسجام فضایی - زمانی خوشه‌ها بینجامد.

در شکل ۶، با حذف سیستماتیک خوشه‌های یک‌ماهه، گامی مؤثر در جهت حذف نوسانات گذرا و تمرکز بر خشکسالی‌های ساختارمند برداشته شده است. حتی در آستانه‌های شدید مانند ۲- و ۳-، هرچند تعداد خوشه‌ها کاهش یافته، اما پایداری زمانی و انسجام فضایی رخدادهای باقی‌مانده افزایش یافته است. این ویژگی، زمینه مناسبی برای تحلیل‌های دینامیکی نظیر مسیر انتشار و شناسایی مرکز ثقل فراهم می‌کند.

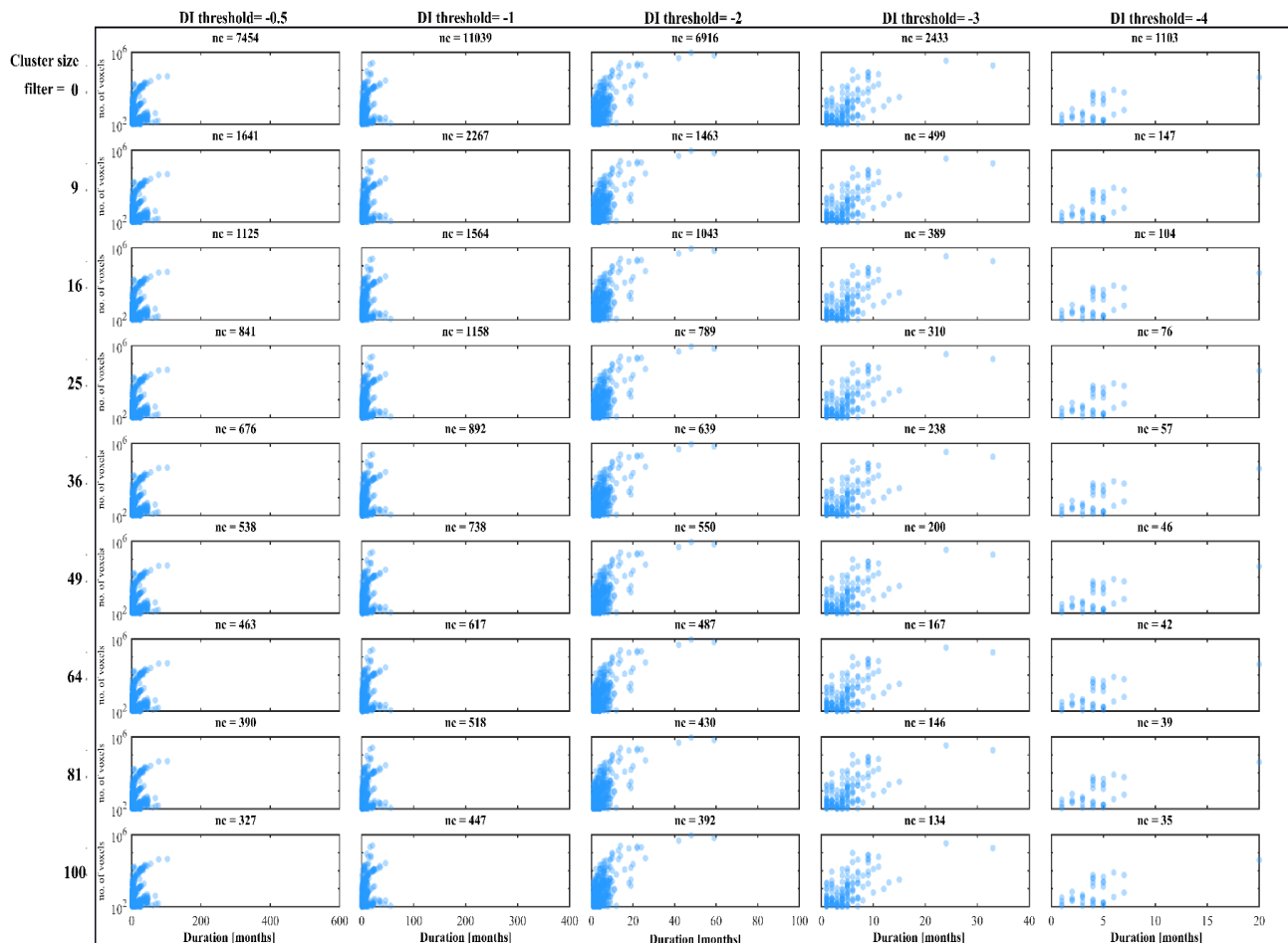
شکل ۷ با تمرکز بر خوشه‌هایی با طول عمر بین ۲ تا ۲۴ ماه، بازه‌ای از خشکسالی‌های کوتاه تا میان‌مدت را پوشش می‌دهد که به‌ویژه در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و منابع آب، اهمیت بالایی دارند. تحلیل این بازه نشان می‌دهد که حتی در بازه‌های زمانی نسبتاً کوتاه، برخی خوشه‌ها از وسعت مکانی قابل‌توجهی برخوردار بوده‌اند و نیازمند توجه راهبردی هستند.

در شکل ۸، با ترکیب پالایش زمانی (حذف خوشه‌های یک‌ماهه) و فیلتر ساختاری (تا سقف ۲۴ ماه)، مجموعه‌ای غربال‌شده از رخدادهای پایدار و قابل‌تکرار ارائه شده است. این ساختار نهایی، هم از نظر تعداد و هم از نظر الگوی فضایی و تداوم زمانی، نمایانگر خوشه‌های معنادار و قابل‌اتکا برای تحلیل‌های پیشرفته‌تر است. در این میان، آستانه ۲- به‌عنوان سطحی بهینه ظاهر شده است که تعادل مناسبی میان فراوانی رخداد، انسجام ساختاری، و پوشش فضایی برقرار می‌سازد.

تحلیل مقایسه‌ای اشکال ۵ تا ۸ نشان می‌دهد که میان تداوم زمانی خوشه‌های خشکسالی و وسعت مکانی آن‌ها، رابطه‌ای مثبت و نسبتاً پایدار وجود دارد. رخداد‌های کوتاه‌مدت (۱ تا ۵ ماه) عمدتاً در مقیاس ده‌ها تا صدها وکسل ظاهر شده‌اند، درحالی‌که خوشه‌هایی با طول عمر بیش از ۱۰ ماه، گاه تا صدها هزار وکسل را دربرگرفته‌اند. این همبستگی در آستانه‌های میانی نظیر ۱- و ۲- برجسته‌تر است و نشان می‌دهد که خشکسالی‌های پایدار، تمایل بیشتری به گسترش فضایی دارند.

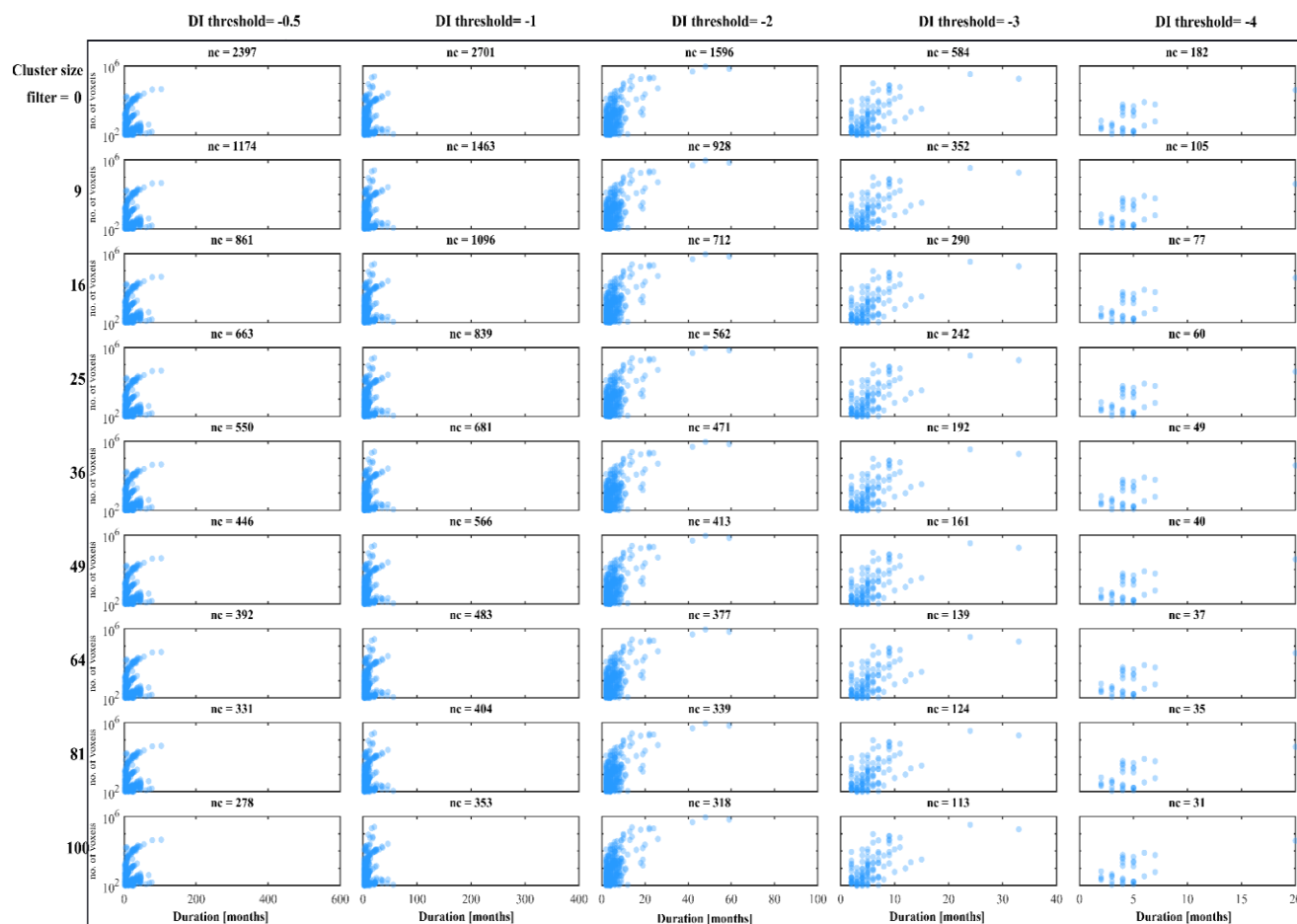
در آستانه‌های بسیار شدید مانند ۴-، هرچند اغلب خوشه‌ها از نظر زمانی کوتاه‌مدت هستند، اما وسعت مکانی برخی از آن‌ها چشمگیر است. این امر می‌تواند ناشی از رخداد‌های خشکسالی بسیار شدید و متمرکز باشد که باوجود مدت‌زمان کوتاه، آثار سنگینی در مقیاس محلی یا ناحیه‌ای بر جای می‌گذارند.

یافته‌ها نشان می‌دهند که انتخاب هم‌زمان و داده‌محور آستانه شاخص و فیلتر ساختاری، شرط ضروری برای پالایش خوشه‌های خشکسالی و افزایش اعتبار تحلیل‌هاست. این رویکرد امکان تمرکز بر رخداد‌های بحرانی و پرتکرار را در تحلیل‌های پیشرفته‌ای چون ردیابی مرکز ثقل و مسیرهای خطر فراهم می‌سازد.



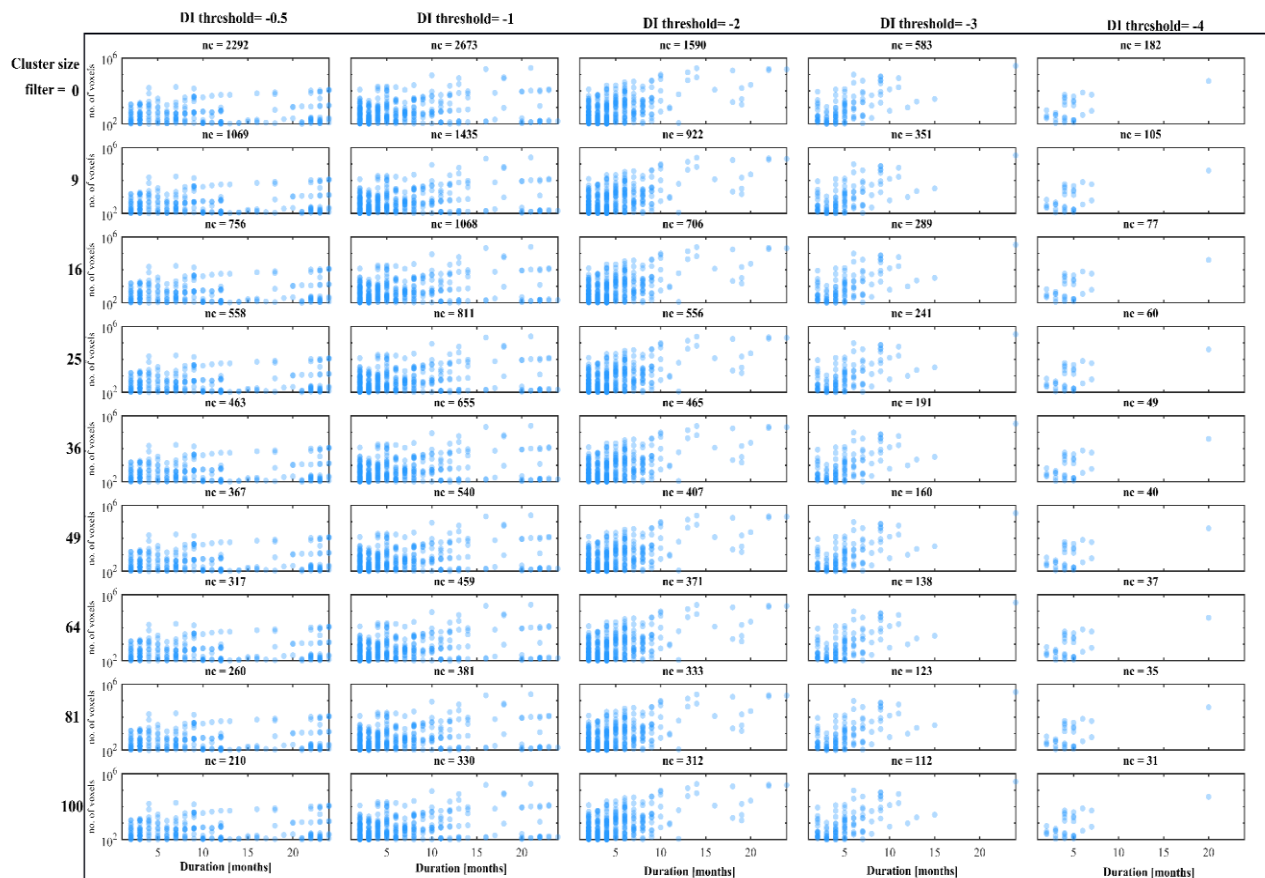
شکل ۵- تعداد خوشه‌ها (nc)، مدت زمان (بر حسب ماه) و بزرگی مکانی (بر حسب تعداد وکسل‌ها) برای تمام آستانه‌های scPDSI (از ۰.۵- تا ۴-) و فیلترهای حداقل اندازه خوشه (از ۰ تا ۱۰۰ وکسل) نشان داده شده‌اند. این نمودار شامل خوشه‌هایی با تمام مدت‌ها و بزرگی‌ها است.

Fig.5. The number of clusters (nc), duration (in months), and spatial magnitude (number of voxels) are shown for all thresholds (-0.5 to -4.0) and minimum cluster size filters (0-100 voxels). This includes clusters of all durations and magnitudes.



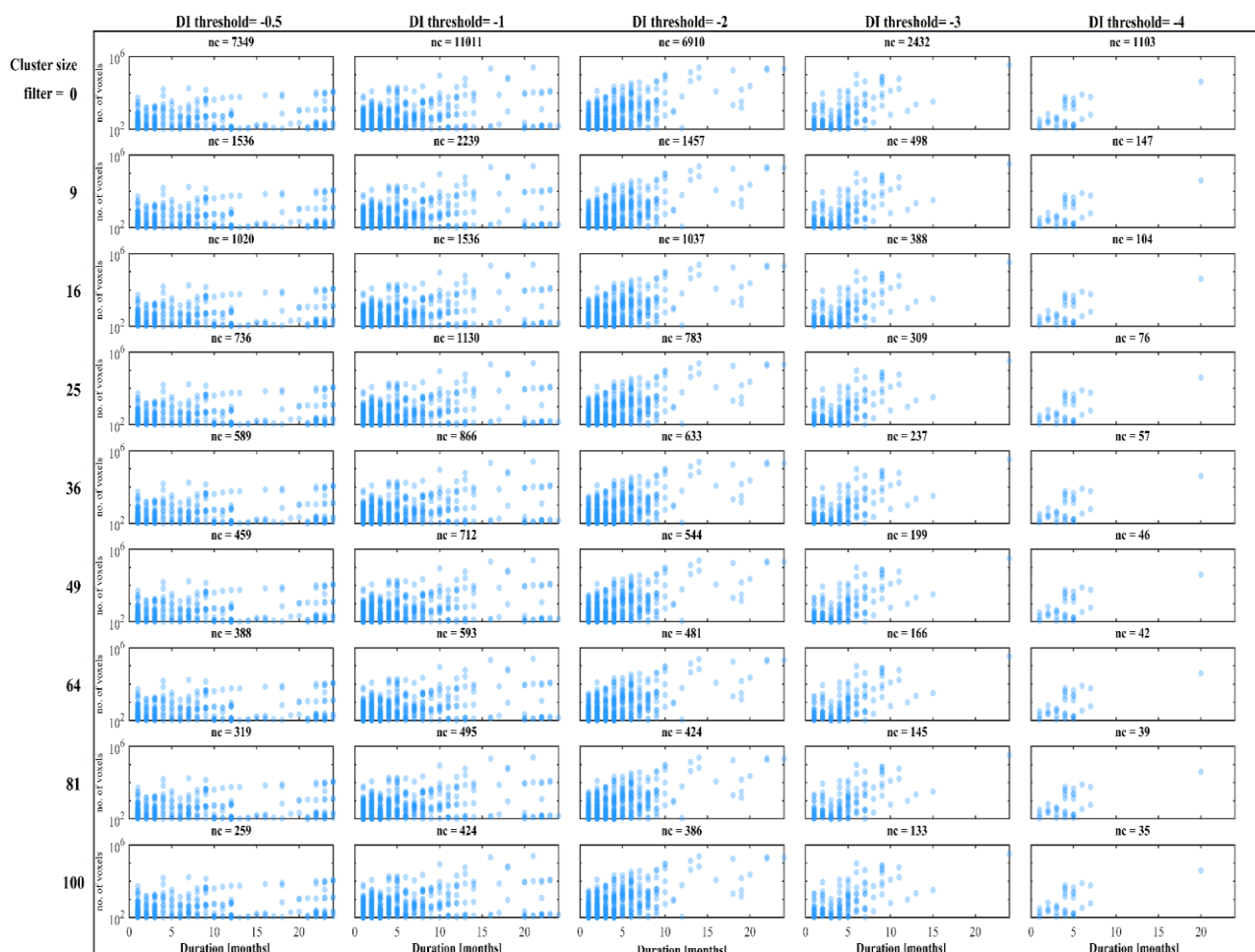
شکل ۶- توزیع پالایش‌شده‌ی خوشه‌های خشکسالی سه‌بعدی با حذف رخداد‌های یک‌ماهه. تنها خوشه‌هایی که حداقل دو ماه تداوم داشته‌اند نمایش داده شده‌اند تا ساختارهای پایدار خشکسالی را در دامنه‌ای از آستانه‌های scPDSI و مقادیر فیلتر اندازه‌ی خوشه برجسته سازند. خوشه‌های یک‌ماهه به منظور حذف ناهنجاری‌های کوتاه‌مدت از تحلیل کنار گذاشته شده‌اند.

Fig.6. Filtered distribution of 3D drought clusters, excluding one-month events. Drought clusters of at least two months in duration were presented, highlighting persistent drought structures across the range of scPDSI thresholds and filter values. One-month clusters were removed to eliminate short-lived anomalies.



شکل ۷- ساختار مدت-بزرگی خوشه‌های خشکسالی سه‌بعدی با مدت کمتر از ۲۴ ماه. این نمودار بر رخداد‌های خشکسالی کوتاه تا میان‌مدت تمرکز دارد و خوشه‌هایی با مدت زمان بین ۲ تا ۲۴ ماه را به تصویر می‌کشد. بزرگی مکانی بر حسب تعداد وکسل بیان شده است که امکان ارزیابی رخداد‌های فشرده اما تأثیرگذار خشکسالی را فراهم می‌سازد.

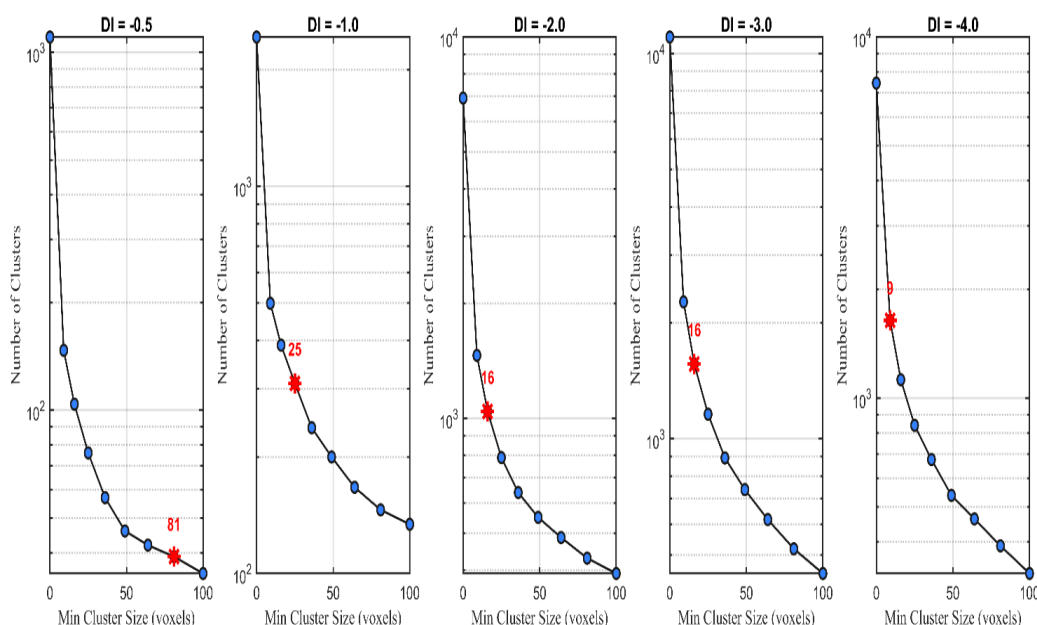
Fig.7. Duration–magnitude structure of 3D drought clusters with durations of less than 24 months. It focuses on short- to medium-duration drought events, visualizing clusters with durations of 2 to 24 months. Spatial magnitude is expressed as the number of voxels, allowing for the assessment of compact yet impactful drought episodes.



شکل ۸- خوشه‌های خشکسالی سه‌بعدی پالایش‌شده با مدت زمان بین ۲ تا ۲۴ ماه. این شکل مجموعه نهایی رخداد‌های خشکسالی پالایش‌شده را نمایش می‌دهد (با حذف خوشه‌های یک‌ماهه و محدود کردن حداکثر مدت زمان به ۲۴ ماه) تا بر خشکسالی‌های کوتاه تا میان‌مدت تمرکز شود؛ رخداد‌هایی که احتمال وقوع مجدد آن‌ها در چرخه‌های کشاورزی یا هیدرولوژیکی بالاست.

Fig.8. Filtered 3D drought clusters with durations between 2 and 24 months were used. The final set of filtered drought events—excluding one-month clusters and limiting the maximum duration to 24 months—emphasizes short- to mid-term droughts likely to recur within agricultural or hydrological cycles.

به منظور افزایش دقت در شناسایی خوشه‌های معنادار خشکسالی و حذف ساختارهای ناپایدار و نوفه، در این پژوهش از یک رویکرد داده‌محور مبتنی بر تحلیل هندسی استفاده شد (شکل ۹). این روش، که تحت عنوان زاویه‌ی داخلی $\cos C$ شناخته می‌شود، بر پایه‌ی انحنای منحنی «تعداد خوشه‌ها در برابر آستانه‌ی اندازه خوشه» عمل می‌کند. با محاسبه‌ی زاویه‌ی بین نقاط متوالی در این منحنی، نقطه‌ای که بیشترین انحنای (نقطه‌ی عطف) را نشان می‌دهد به عنوان مقدار بهینه‌ی فیلتر خوشه تعیین می‌گردد. اجرای این روش در پنج سطح مختلف از شاخص (از ۰/۵- تا ۴-) نشان داد که در آستانه ۲-، مقدار بهینه برای فیلتر اندازه خوشه برابر با ۱۶ وکسل است. این نقطه نشان‌دهنده‌ی گذار از خوشه‌های کوتاه‌مدت و کوچک‌مقیاس به رخدادهایی با پایداری زمانی و ساختار هیدرولوژیکی معنادار است. اعمال این فیلتر ۱۶ وکسلی منجر به پالایش قابل توجه مجموعه داده‌ها شد، به گونه‌ای که ضمن حذف ناهنجاری‌های ساختاری و نویزهای آماری، انسجام مکانی-زمانی خوشه‌های خشکسالی افزایش یافت. این مرحله از پالایش، بنیانی مطمئن برای انجام تحلیل‌های پیشرفته‌تری همچون بررسی روندهای زمانی، رفتار انتشار مکانی و شناسایی الگوهای اقلیمی فراهم ساخت.

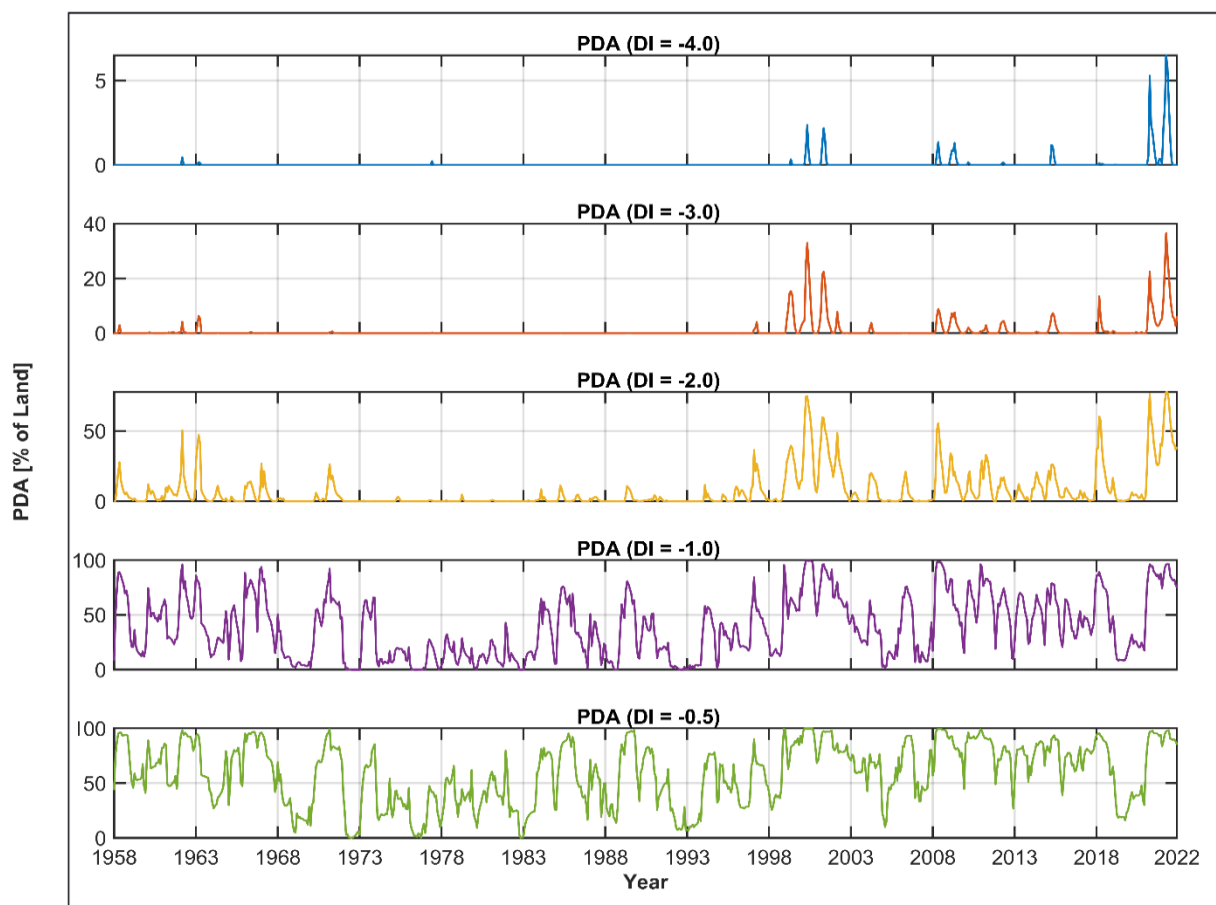


شکل ۹- شناسایی اندازه‌ی بهینه‌ی فیلتر پالایش خوشه‌ها

Fig.9. Identification of optimal cleaning filter size

شکل ۱۰ روند تغییرات درصد ناحیه‌ی تحت تأثیر خشکسالی (PDA) را در سطح ملی طی سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ و در پنج آستانه‌ی مختلف شاخص خودتنظیم پالمر نمایش می‌دهد. در آستانه‌های ملایم‌تر (۰/۵- و ۱-)، خشکسالی‌ها تقریباً به صورت مستمر در کشور رخ داده‌اند، به گونه‌ای که در مقاطع متعددی بیش از ۴۰ تا ۸۰ درصد از پهنه‌ی سرزمینی ایران درگیر شرایط خشکسالی بوده است. این روند مستمر بازتابی از نوسانات فصلی، بین‌سالی و فشار آبی مزمن در اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران است. در آستانه ۲-، خشکسالی‌های چندساله با شدت متوسط تا زیاد برجسته‌تر شده‌اند و قله‌های قابل توجهی در دوره‌های خاصی مانند اواخر دهه ۱۹۶۰، اوایل دهه ۱۹۸۰ و دهه‌ی نخست قرن بیستم (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰) مشاهده می‌شود. این بازه‌ها نمایانگر تنش‌های اقلیمی پیوسته در مقیاس منطقه‌ای هستند که غالباً با آثار اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی همراه بوده‌اند. با شدت یافتن آستانه ۳- و ۴-)، مساحت تحت تأثیر خشکسالی به طور طبیعی کاهش می‌یابد (کمتر از ۲۰ درصد و ۵ درصد به ترتیب)، اما هم‌زمان، افزایش بسامد خشکسالی‌های شدید از دهه‌ی ۲۰۰۰ به بعد، دلالت بر گذار به یک رژیم اقلیمی پدیده‌ی خشکسالی‌های مرکب و شدید در دهه‌های اخیر است و به‌ویژه از دهه‌ی ۲۰۰۰ به بعد، دلالت بر گذار به یک رژیم اقلیمی پایدارتر و مزمن‌تر از خشکسالی دارد؛ وضعیتی که در آن رخدادهای خشکسالی نه تنها شدیدتر، بلکه ساختار یافته‌تر و تکرار شونده‌تر

شده‌اند. نکته‌ی مهم آن است که در تمامی آستانه‌ها، سطح پایه‌ی PDA پس از سال ۲۰۰۰ روندی افزایشی نشان می‌دهد، که می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از گذار به سمت رژیم‌های اقلیمی خشک‌تر و پایدارتر تفسیر شود. این تغییر احتمالاً با پیامدهای تغییر اقلیم، از جمله افزایش دمای هوا، تشدید تبخیر و تعرق، و کاهش ظرفیت ذخیره‌ی رطوبت خاک مرتبط است.



شکل ۱۰- سری زمانی درصد ناحیه تحت تأثیر خشکسالی (PDA) در ایران طی دوره‌ی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲

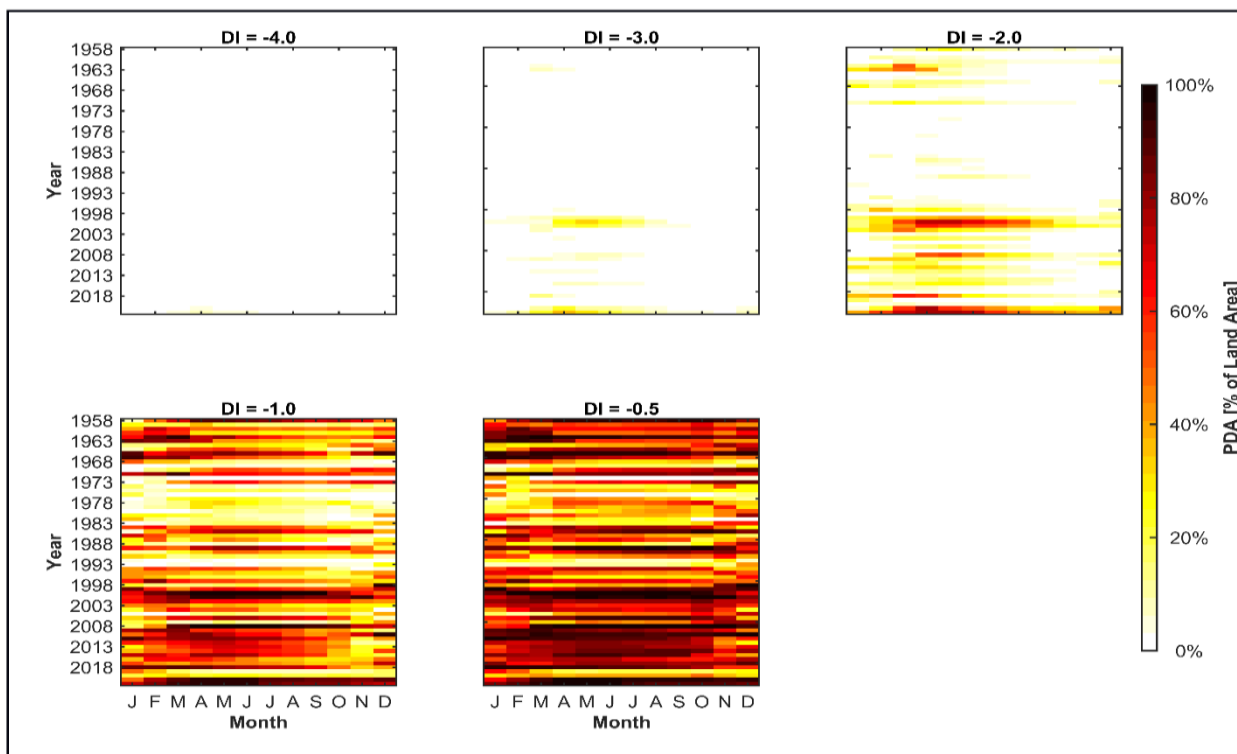
Fig.10. Time series of Percentage Drought-Affected Area (PDA) across Iran from 1958 to 2022

بررسی الگوی ماهانه خشکسالی‌ها در شکل ۱۱، یافته‌های پیشین را تکمیل کرده و شواهد قوی‌تری از گذار ساختاری به رژیم خشکسالی پایدارتر پس از سال ۲۰۰۰ فراهم می‌آورد. به‌ویژه در آستانه‌های ۱- و ۲-، نه تنها فراوانی رخدادها افزایش یافته، بلکه الگوی زمانی آن‌ها نیز از نوسانات پراکنده به خوشه‌های فصلی متمرکزتر تغییر یافته است.

شکل ۱۱، نقشه‌های حرارتی ماهانه درصد ناحیه تحت تأثیر خشکسالی را در گستره ایران طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ و بر اساس پنج سطح آستانه شاخص خودتنظیم پالمر نمایش می‌دهد. در آستانه‌های خفیف‌تر (۰/۵- و ۱-)، مقادیر PDA در بیشتر سال‌های مطالعه در سطوح بالا و نسبتاً پایدار قرار گرفته‌اند. اوج‌های فصلی در بازه بهار (آوریل تا ژوئن) و اواخر تابستان تا اوایل پاییز (اوت تا اکتبر) به‌وضوح مشاهده می‌شود که بازتاب‌دهنده فعال‌بودن خشکسالی در دوره‌های حساس هیدرولوژیکی، مانند زمان رشد محصولات زراعی و تغذیه منابع آبی سطحی است. با افزایش شدت آستانه (۲- و پایین‌تر)، تعداد ماه‌های خشکسالی کاهش یافته، اما شدت و وسعت رخدادها افزایش یافته است. به‌ویژه در سال‌هایی مانند ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱، قله‌های PDA به‌گونه‌ای شکل گرفته‌اند که در برخی ماه‌ها بیش از ۶۰ درصد کشور درگیر خشکسالی‌های شدید بوده است. این مقاطع زمانی بیانگر بروز خشکسالی‌های فراگیر و چندماهه‌اند که با ساختارهای خشکسالی سب‌بعدی نیز هم‌راست است. در

آستانه‌های بسیار شدید (۳- و ۴-)، پوشش خشکسالی به شدت کاهش یافته و به رخدادهایی محدود می‌شود که اغلب ماهیتی پراکنده، منطقه‌ای و مقطعی دارند. با این حال، همین خشکسالی‌های محدود از نظر شدت و اثرگذاری قابل توجه‌اند و عمدتاً در دهه ۲۰۰۰ به بعد تمرکز یافته‌اند.

نکته قابل توجه، روند افزایشی پایه PDA در آستانه‌های میانی (۱- و ۲-) پس از سال ۲۰۰۰ است که نشان‌دهنده افزایش ماندگاری و تکرارپذیری خشکسالی‌ها در ایران طی دهه‌های اخیر است. این روند، با یافته‌های حاصل از تحلیل ساختارهای سه‌بعدی و پویایی زمانی خشکسالی در این پژوهش کاملاً هم‌راستا بوده و می‌تواند به عنوان نشانه‌ای از تغییر رژیم اقلیمی کشور به سمت شرایط خشک‌تر و ناپایدارتر تلقی گردد. در ادامه، ویژگی‌های مکانی - زمانی بررسی شده‌اند.

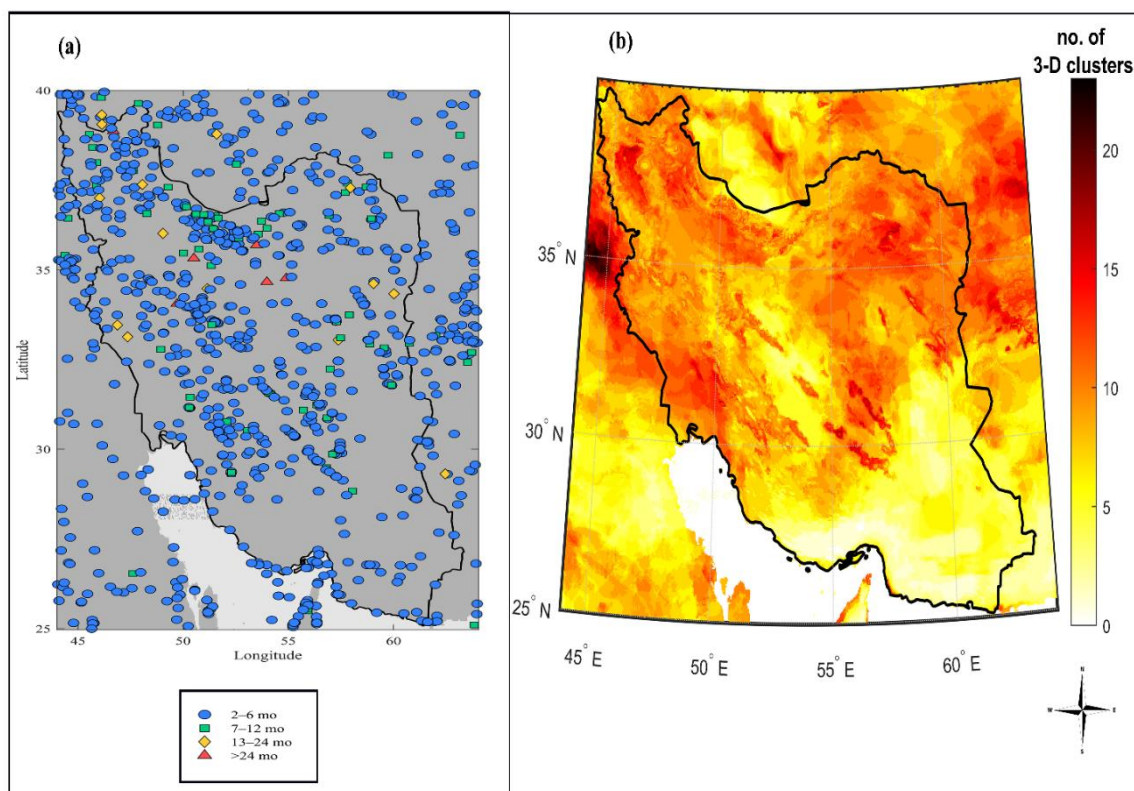


شکل ۱۱- نقشه‌های حرارتی ماهانه درصد ناحیه تحت تأثیر خشکسالی (PDA) در ایران طی دوره‌ی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲
Fig.11. Monthly heatmaps of Percentage Drought-Affected Area (PDA) across Iran from 1958 to 2022

تحلیل ساختار خشکسالی‌های سه‌بعدی با بهره‌گیری از آستانه شاخص ۲- و فیلتر بهینه‌ی ۱۶ و کسل، چشم‌اندازی دقیق از رفتار فضایی و الگوهای تکرار خشکسالی در ایران طی بازه‌ی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ ترسیم می‌کند (شکل ۱۲).

در بخش (a) از شکل ۱۲، مراکز هندسی خوشه‌های خشکسالی بر مبنای طول مدت رخداد در چهار طبقه‌ی زمانی به تصویر کشیده شده‌اند. رخداد‌های کوتاه‌مدت (۲ تا ۶ ماه) در سطح کشور پراکندگی بالایی دارند، به‌ویژه در مناطق مرطوب شمالی و نواحی خشک مرکزی، که این توزیع گسترده بیانگر نوسانات فصلی و بین‌سالی در اقلیم ایران است. در مقابل، خوشه‌های بلندمدت (بیش از ۱۲ ماه) عمدتاً در استان‌های مرکزی، شرقی و غربی از جمله یزد، سمنان، اصفهان، آذربایجان غربی و خراسان‌ها متمرکز هستند. عدم حضور خشکسالی‌های طولانی‌مدت در سواحل جنوبی و نواحی خزری، احتمالاً بازتابی از نقش سامانه‌های تعدیل‌گر اقلیمی همچون دریای خزر و مونسون تابستانه‌ی هند است که موجب محدودسازی پایداری خشکسالی در این نواحی شده‌اند.

بخش (b) شکل ۱۲ نیز فراوانی مکانی وقوع خوشه‌های سه‌بعدی خشکسالی را نشان می‌دهد. بیشترین تکرار (بیش از ۲۰ رخداد) در فلات مرکزی و استان‌هایی نظیر سمنان، یزد، اصفهان، ایلام و آذربایجان غربی مشاهده می‌شود؛ مناطقی که می‌توان آن‌ها را کانون‌های پرتکرار خشکسالی و پرتنش اقلیمی در کشور دانست. در مقابل، نواحی با کمترین نرخ تکرار، عمدتاً در سواحل جنوبی و شمالی کشور واقع‌اند که با ویژگی‌های اقلیم مرطوب یا موسمی آن‌ها مطابقت دارد.



شکل ۱۲- (a) مراکز خوشه‌های خشکسالی سه‌بعدی شناسایی شده در بازه‌ی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲، دسته‌بندی شده بر اساس مدت زمان خوشه [بر حسب ماه]. (b) فراوانی وقوع خوشه‌های خشکسالی در هر سلول شبکه طی دوره‌ی مورد مطالعه.

Fig.12. (a) Centroids of 3-D drought clusters detected from 1958 to 2022, classified by cluster duration [months]. (b) Frequency of cluster occurrence in each grid cell during the study period.

برآیند کلی یافته‌های این پژوهش، تصویری روشن و ساختاریافته از تحول زمانی-فضایی خشکسالی‌های ایران طی بیش از شش دهه گذشته ارائه می‌دهد. از یک‌سو، تحلیل‌های آماری و جغرافیایی گویای آن‌اند که از اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی، رخداد‌های خشکسالی در کشور به‌سوی الگویی شدیدتر، مکررتر و ساختاریافته‌تر میل کرده‌اند؛ الگویی که از نظر مکانی، با تمرکز در نواحی مرکزی، شرقی و شمال غرب کشور و از نظر زمانی، با انسجام و تداوم بیشتر همراه بوده است. از سوی دیگر، چارچوب نوآورانه خوشه‌بندی سه‌بعدی به‌کاررفته در این پژوهش، امکان تحلیل دقیق‌تری از پویایی خشکسالی‌ها را فراهم ساخت؛ به‌ویژه از منظر تعیین آستانه‌های بهینه، پالایش نویز و شناسایی کانون‌های نوظهور. این روش داده‌محور نه تنها در شناسایی روندهای پنهان اقلیمی مؤثر بوده، بلکه افق‌های نوینی در پایش، هشدار و سیاست‌گذاری اقلیمی کشور گشوده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با بهره‌گیری از روش خوشه‌بندی سه‌بعدی و داده‌های اقلیمی با وضوح بالا شاخص خودتنظیم پالمر، تصویری جامع و کم‌نظیر از ساختار، الگوها و تحولات خشکسالی در ایران طی بازه ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ ارائه گردید. مهم‌ترین نتایج و دلالت‌های علمی و عملیاتی این پژوهش را می‌توان در چهار محور خلاصه کرد:

الف) گذار به رژیم خشکسالی پایدارتر: از اوایل دهه‌ی ۲۰۰۰ میلادی، خشکسالی‌ها در ایران وارد مرحله‌ای جدید شده‌اند؛ رخدادهایی بزرگ‌تر، بادوام‌تر و با فواصل کوتاه‌تر. این دگرگونی ساختاری، نشانه‌ای از هم‌زمانی اثرات تغییر اقلیم جهانی و نوسانات منطقه‌ای مانند ENSO یا کاهش پوشش برف زمستانی است، استمرار این رخدادهای تهدید می‌مضاعف برای منابع آب زیرزمینی، امنیت غذایی و تعادل بوم‌نظام‌ها محسوب می‌شود (Madani, 2014).

ب) تعیین آستانه بهینه و خوشه‌های معنادار: تحلیل حساسیت به آستانه‌های مختلف شاخص خودتنظیم پالمر نشان داد که آستانه ۲- در کنار فیلتر هندسی ۱۶ و کسل، تعادلی منطقی میان حساسیت و دقت فراهم می‌کند. این نوآوری نه تنها از حذف نوفه‌های فضایی جلوگیری کرد بلکه تحلیل‌ها را به سمت خشکسالی‌های واقعی، فیزیکی و ساختاری هدایت کرد (Pyarali et al., 2024; Diaz et al., 2024).

ج) بازپیکربندی فضایی و کانون‌های جدید خشکسالی: توزیع مکانی خشکسالی‌های شناسایی شده بیانگر آن است که اگرچه نواحی خشک سنتی (مرکز و جنوب شرق) همچنان در معرض بیشترین خشکسالی‌ها هستند، اما مناطق دیگری نیز به نقشه خطر افزوده شده‌اند. در دو دهه اخیر، مناطق مرکزی، غربی، شمال شرقی و شمال غربی ایران به کانون‌های تازه خشکسالی‌های شدید بدل شده‌اند؛ مناطقی که پیش‌تر کمتر دچار خشکسالی‌های طولانی می‌شدند. این تغییر الگوی فضایی حاکی از آن است که اثرات خشکسالی در کشور گسترده‌تر شده و بسیاری از استان‌ها که شاید در گذشته مشکل کم‌آبی حاد نداشتند، اکنون با تهدید خشکسالی‌های پیایی روبرو هستند. چنین یافته‌ای بر ضرورت بازنگری در برنامه‌های سازگاری اقلیمی و مدیریت منابع آب در سطح ملی تأکید دارد، به نحوی که تمامی مناطق درگیر را پوشش دهد.

د) اعتبار و ظرفیت چارچوب سه‌بعدی در پیش‌بینی و هشدار: این مطالعه نشان داد که خوشه‌بندی سه‌بعدی خشکسالی نه تنها برای پایش گذشته، بلکه برای پیش‌بینی مسیر گسترش خشکسالی‌ها نیز ابزاری توانمند است. توسعه آتی این چارچوب شامل تحلیل سرعت و شتاب خوشه‌ها، ترکیب با شاخص‌های چندمتغیره و اتصال به پایگاه‌های خسارات اقتصادی می‌تواند افق‌های نوینی در مدیریت سازگار با تغییر اقلیم بگشاید (Shayeghi et al., 2024).

در مجموع، یافته‌های این پژوهش بر لزوم تغییر رویکرد حکمرانی اقلیمی در ایران تأکید دارند؛ از مدیریت واکنشی به برنامه‌ریزی پیش‌نگر، از تحلیل ایستا به تحلیل پویای خشکسالی، و از مداخلات محلی به راهبردهای شبکه‌ای و منطقه‌ای. امید است با بهره‌گیری از این چارچوب علمی، سیاست‌گذاری خشکسالی در کشور وارد مرحله‌ای کارآمدتر، منسجم‌تر و آینده‌نگران‌تر گردد.

References

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5, 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Alayi Talaghani, M. (2009). *Geomorphology of Iran*. Tehran: Ghoomes Publications. [In Persian]
- Andreadis, K. M., Clark, E. A., Wood, A. W., Hamlet, A. F., & Lettenmaier, D. P. (2005). Twentieth-century drought in the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6), 985–1001. <https://doi.org/10.1175/JHM450.1>
- Araghi, A. R., Martinez, C. J., & Adamowski, J. F. (2023). Evaluation of TerraClimate gridded data across diverse climates in Iran. *Earth Science Informatics*, 16, 1347–1358. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-00967-z>

- Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., Van Dijk, A. I.,... & Adler, R. F. (2019). MSWEP V2 global 3-hourly 0.1 precipitation: methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3), 473-500. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>
- Cook, B. I., Ault, T. R., & Smerdon, J. E. (2015). Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Science advances*, 1(1), e1400082. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400082>
- Diaz, V., Corzo Perez, G. A., Van Lanen, H. A. J., & Solomatine, D. P. (2024). Three-Dimensional Clustering in the Characterization of Spatiotemporal Drought Dynamics: Cluster Size Filter and Drought Indicator Threshold Optimization. *Advanced Hydroinformatics: Machine Learning and Optimization for Water Resources*, 319-342. <https://doi.org/10.1002/9781119639268.ch11>
- Diaz, V., Perez, G. A. C., Van Lanen, H. A., Solomatine, D., & Varouchakis, E. A. (2020). An approach to characterise spatio-temporal drought dynamics. *Advances in Water Resources*, 137, 103512. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103512>
- Fathi Taperasht, A., Shafizadeh-Moghadam, H., & Kouchakzadeh, M. (2022). Spatial-temporal analysis of Iran's climatic classification based on Domarten method and Mann-Kendall test in the statistical period of 1995-2019. *Environmental Sciences*, 20(3), 137-154. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/envs.2021.1105>
- Forootan, E., Safari, A., Mostafaie, A., Schumacher, M., Delavar, M., & Awange, J. L. (2017). Large-scale total water storage and water flux changes over the arid and semiarid parts of the Middle East from GRACE and reanalysis products. *Surveys in Geophysics*, 38(3), 591-615. [In Persian] <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9403-1>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations – A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gebrechorkos, S. H., Hülsmann, S., & Bernhofer, C. (2019). Long-term trends in rainfall and temperature using high-resolution climate datasets in East Africa. *Scientific Reports* 9, 11376. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47933-8>
- Haralick, R. M., & Shapiro, L. G. (1992). *Computer and robot vision II*. Addison-Wesley.
- Herrera-Estrada, J. E., & Diffenbaugh, N. S. (2020). Landfalling droughts: Global tracking of moisture deficits from the oceans onto land. *Water Resources Research*, 56(9), e2019WR026877. <https://doi.org/10.1029/2019WR026877>
- Hosseini, A., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2021). Characterization of drought dynamics in Iran by using S-TRACK method. *Theoretical and Applied Climatology*, 145, 661–671. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03656-3>
- Khosravi, M., Abbasnia, M., Ghobadi, A., & Armesh, M. (2017). Investigating the spatial relationship between spring convective precipitation and topography in northwestern Iran. *Geography and Urban-Regional Planning*, 7(23), 21–38. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/gaij.2017.3222>
- Lloyd-Hughes, B. (2012). A spatio-temporal structure-based approach to drought characterization. *International Journal of Climatology*, 32(3), 406–418. <https://doi.org/10.1002/joc.2280>
- Liu, Z., Hu, S., & Mo, X. (2025). Spatiotemporal Variation of Compound Drought and Heatwave Events in Semi-Arid and Semi-Humid Regions of China. *Atmosphere*, 16(5), 568. <https://doi.org/10.3390/atmos16050568>
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- Najafi, M. S., & Alizadeh, O. (2023). Climate zones in Iran. *Meteorological Applications*, 30(5), e2147. <https://doi.org/10.1002/met.2147>
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (Research Paper 45). U.S. Weather Bureau.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

- Pyarali, K., Peng, J., Disse, M., & Tuo, Y. (2022). Development and application of high resolution SPEI drought dataset for Central Asia. *Scientific Data*, 9(1), 172. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01279-5>
- Razmi, R., Sotoudeh, F., Ghane, M., & Ostad-Ali-Askari, K. (2022). Temporal-spatial analysis of drought and wet periods: case study of a wet region in Northwestern Iran (East Azerbaijan, West Azerbaijan, Ardebil and Zanjan provinces). *Applied Water Science*, 12(11), 251. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01765-6>
- Sadeghi, F., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2022). Long-term analysis of the spatiotemporal standardized precipitation evapotranspiration index for West Asia. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1183. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10458-y>
- Shayeghi, A., Ziveh, A. R., Bakhtar, A., Teymouri, J., Hanel, M., Godoy, M. R. V., ... & AghaKouchak, A. (2024). Assessing drought impacts on groundwater and agriculture in Iran using high-resolution precipitation and evapotranspiration products. *Journal of Hydrology*, 631, 130828. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130828>
- Sheffield, J., Wood, E., & Roderick, M. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491, 435–438. <https://doi.org/10.1038/nature11575>
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9(1), 1464. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>
- Verhoeven, E., Wardle, G. M., Roth, G. W., & Greenville, A. C. (2022). Characterising the spatiotemporal dynamics of drought and wet events in Australia. *Science of the Total Environment*, 846, 157480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157480>
- Vernieuwe, H., De Baets, B., & Verhoest, N. E. (2020). A mathematical morphology approach for a qualitative exploration of drought events in space and time. *International Journal of Climatology*, 40(1), 530–543. <https://doi.org/10.1002/joc.6226>
- Wang, D., Jia, H., Tang, J., & Liu, N. (2025). Analysis of the spatiotemporal patterns and propagation characteristics of drought risk in China. *Frontiers of Earth Science*, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11707-024-1139-5>
- Wei, W., Lu, D., Song, Y., Sherif, M., Dewan, A., Liu, T & Wang, X. (2025). Spatiotemporal characteristics of drought events in Asia from a three-dimensional perspective. *Climate Dynamics*, 63(3), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00382-025-07645-4>
- Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335–2351. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C2335:ASPDSE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C2335:ASPDSE%3E2.0.CO;2)
- World Meteorological Organization (WMO). (2006). *Drought monitoring and early warning: Concepts, progress and future challenges* (WMO No. 1006). Geneva: WMO
- Yang, G., Chang, J., Wang, Y., Guo, A., Zhang, L., Zhou, K., & Wang, Z. (2024). Understanding drought propagation through coupling spatiotemporal features using vine copulas: A compound drought perspective. *Science of the Total Environment*, 921, 171080. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171080>